



**HAL**  
open science

## Геоинформационное моделирование риска лесных пожаров в Республике Саха (Якутия)

Pior Janiec, Sébastien Gadal, Svetlana Ivanova

### ► To cite this version:

Pior Janiec, Sébastien Gadal, Svetlana Ivanova. Геоинформационное моделирование риска лесных пожаров в Республике Саха (Якутия). Успехи современного естествознания (Advances in Current Natural Sciences), 2019, 11 2019, pp.37-42. <10.17513/use.37237>. <hal-02408358>

**HAL Id: hal-02408358**

**<https://hal.science/hal-02408358v1>**

Submitted on 17 Dec 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

УДК 630\*431.5(571.56)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В РЕСПУБЛИКЕ САХА (ЯКУТИЯ) МЕТОДАМИ ГИС

Янец П.К., Гадал С.Ж., Иванова С.А.

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,  
Якутск, e-mail: sviv@mail.ru

В данной статье рассматриваются лесные пожары в Якутии как один из основных видов стихийных угроз природного характера, а также факторы их возникновения и предлагаются методы геоинформационного моделирования риска лесных пожаров на территории Республики Саха (Якутия). Леса Якутии занимают значительную площадь. Лесные пожары ежегодно охватывают территории площадью сотни тысяч гектаров. В статье проанализировано воздействие различных факторов на риск возникновения лесных пожаров с помощью линейного коэффициента корреляции и коэффициента детерминации. Для прогнозирования риска возникновения лесных пожаров использовалось ГИС-моделирование. Оно осуществлялось поэтапно: сбор различных типов данных и их интегрирование в базу ГИС, проверка влияния отдельных факторов на возникновение пожаров, оценка риска возникновения лесных пожаров с применением средств искусственного интеллекта и машинного обучения. В исследовании использовались глобальные источники информации о пожарах – Система управления информацией о пожарах (СУИП). Данные, доступные в сервисе, собраны со спутниковых систем и MODIS Collection 6 Active Fire Product, а также VIIRS 375 м, 750 м. В статье приведены результаты оценки влияния воздействия отдельных факторов на возникновение лесных пожаров. Проведенный анализ показал, что наибольшее влияние оказали такие факторы, как солнечная радиация, максимальная температура (июля), индекс NDVI, высота над уровнем моря, уклон, человеческий фактор (расстояние до дорог, удаленность от населенных пунктов и рек). Для оценки риска возникновения пожаров использовались следующие методы искусственного интеллекта и машинного обучения: методы случайного леса и максимальной энтропии. С помощью ГИС-моделирования созданы географические карты риска возникновения лесных пожаров в Якутии. На картах выделены зоны очень низкой, низкой, средней, высокой, очень высокой и экстремально высокой вероятности возникновения лесных пожаров.

**Ключевые слова:** Республика Саха, Якутия, лесные пожары, риск лесных пожаров, геоинформационное моделирование, лесопожарное прогнозирование

## GEOINFORMATION MODELING OF FOREST FIRE RISK IN THE SAKHA REPUBLIC (YAKUTIA)

Yanets P.K., Gadal S.Zh., Ivanova S.A.

North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov, Yakutsk, e-mail: sviv@mail.ru

This article describes forest fires in Yakutia as one of the main types of natural hazards, as well as the factors of their occurrence and proposes methods of geoinformation modeling of forest fire risk in the Republic of Sakha (Yakutia). Forests of Yakutia occupy a significant area. Forest fires annually cover an area of hundreds of thousands of hectares. The article analyzes the impact of various factors on the risk of forest fires using the linear correlation coefficient and the coefficient of determination. GIS modeling was used to predict the risk of forest fires. It was carried out in stages: the collection of different types of data and their integration into the GIS database, checking the impact of individual factors on the fire occurrence, assessing the risk of forest fires using artificial intelligence and machine learning. The study used global sources of fire information - the fire information management system (FMS). The data available in the service are collected from satellite systems and MODIS Collection 6 Active Fire Product, as well as VIIRS 375 m, 750 m. The article presents the results of assessing the impact of individual factors on the occurrence of forest fires. The analysis showed that the greatest influence was exerted by such factors as solar radiation, maximum temperature (July), NDVI index, altitude, slope, human factor (distance to roads, distance from settlements and rivers). The following artificial intelligence and machine learning methods were used to assess fire risk: random forest and maximum entropy methods. With the help of GIS modeling, geographical maps of the risk of forest fires in Yakutia were created. The maps highlight areas of very low, low, medium, high, very high and extremely high probability of forest fires.

**Keywords:** Sakha Republic, Yakutia, forest fires, forest fire risk, geoinformational modeling, forest fire forecasting

Лесные пожары в России в целом и в Республике Саха (Якутия) в частности являются одной из основных и наиболее распространенных стихийных угроз природного характера. Ежегодно в Якутии горят сотни тысяч гектаров леса. В настоящее время площадь, охваченная лесными пожарами, сильно возросла. По результатам научных исследований, не последнюю роль в распространении пожаров играет

человеческий фактор. Почти половина всех лесных пожаров, произошедших в Якутии, вызвана человеком [1].

На возникновение и распространение лесных пожаров оказывает воздействие комплекс различных факторов, которые взаимно усиливают друг друга и формируют условия, содействующие возгоранию лесов. Геоинформационные системы и современные методы дистанционного зонди-

рования являются востребованным и эффективным средством выделения наиболее важных факторов, влияющих на пожары. ГИС-технологии эффективны для построения необходимых долгосрочных моделей пожарной безопасности.

Цель исследования: геоинформационное моделирование риска лесных пожаров в Республике Саха (Якутия).

### Материалы и методы исследования

В качестве исходного материала были использованы данные полевых исследований, спутниковые снимки Modis, GMTED2010, Landsat 5, TERRA, VII RS, имеющие разное пространственное и спектральное разрешение, векторные изображения (OpenStreetMap), климатические и метеорологические данные (WORLDCLIM), а также итоги опросов местного населения.

ГИС-моделирование риска возникновения лесных пожаров осуществлялось поэтапно. На первом этапе производился сбор различных типов данных: растровые, векторные файлы, количественные и качественные индикаторы, которые затем вводились в базу геоданных геоинформационной системы. Сведения о пожарах были получены из Системы управления информацией о пожарах (СУИП), это наиболее доступный современный глобальный источник информации о пожарах. Данные, представленные в СУИП, получены со спутников MODIS Collection 6 Active Fire Product, VIIRS 375 м, 750 м.

На втором этапе данные обрабатывались, классифицировались, извлекались результаты классификации для огневых точек и с помощью коэффициентов корреляции оценивались взаимосвязи между точками возгорания и отобранными факторами.

Далее для оценки риска лесных пожаров рассматривались различные методы искусственного интеллекта и машинного обучения. В результате проведенного анализа было отобрано два метода:

- 1) метод максимальной энтропии;
- 2) метод случайного леса.

Лес является сложной природной системой, объектом исследования разных научных направлений. В данной работе мы воспользуемся определением, которое дала Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО). Эта организация трактует понятие лес следующим образом: «Лес – это участок земной поверхности с деревьями высотой выше 5

м (или способными достичь этой высоты в данном месте в процессе роста), который занимает площадь более 0,5 га. В понятие «лес» не включаются участки, которые используются под сельскохозяйственные цели или как городские земли» [2]. При этом указывается, что в площадь леса входят и сторевшие участки.

Далее, рассмотрим понятие «лесной пожар». Все та же ФАО отмечает, что лесной пожар представляет собой неконтролируемое человеком горение и распространение огня на лесной территории. Это стихийное явление, которое с трудом поддается тушению и может принимать катастрофические масштабы.

Для предупреждения лесных пожаров необходимо определить риск их возникновения. Согласно ФАО, риск лесного пожара – это вероятность возникновения пожара, которая определяется наличием и активностью какого-либо лесопожарного фактора [2]. Риск возникновения пожара зависит от сочетания пожарной опасности и источников возгорания. Другими словами, риск пожаров определяется как совокупность двух факторов: *вероятности* возникновения пожара и *последствий* пожара. В данной работе мы не рассматриваем последствия, только вероятность. Таким образом, мы можем предположить, что пожарный риск – это вероятность пожара, интегрированная в математическую формулу, которая включает в себя все потенциально переменные (факторы), влияющие на вероятность пожара [3, с. 10].

Лесные пожары могут распространяться с вариативной скоростью, охватывать разные площади, то есть иметь разный режим. На режим лесных пожаров воздействуют метеорологические явления, горючесть материалов, рельеф и другие факторы [4]. К. Чендлер указывает: «Огневая опасность является результатом как постоянных, так и переменных факторов пожарной опасности, влияющих на начало, распространение и трудность контроля пожаров и причиняемого им ущерба» [5].

К. Чендлер выделил два типа факторов: постоянные и переменные (рис. 1).

Постоянные факторы не меняются на протяжении многих лет. Количество горючего материала является главным параметром, от которого зависит пожар [6]. Переменные факторы, могут меняться практически ежечасно. Эти показатели должны постоянно измеряться и анализироваться в течение всего пожарного сезона [7].

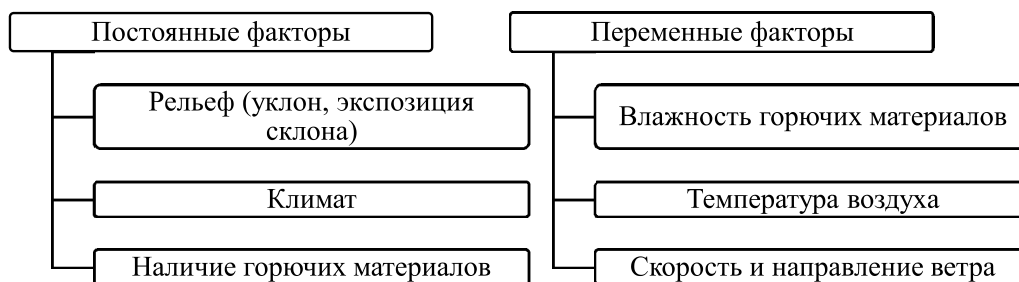


Рис. 1. Факторы, влияющие на режим лесных пожаров

Антропогенный фактор также оказывает большое влияние на риск возникновения и на распространение лесных пожаров. Хотя деятельность человека изменчива, однако нельзя сказать, что ее характер меняется очень быстро. Поэтому мы использовали антропогенный фактор как постоянный.

В данном исследовании мы рассматриваем только долгосрочные факторы пожара, которые разделили на 4 группы:

- рельеф (высота, направление склона, уклон);
- климат (среднегодовое количество осадков, температура воздуха: среднегодовая и максимальная, солнечная радиация (излучение);
- наличие горючих материалов (биомасса);
- антропогенный фактор (расстояние от дорог, удаленность от населенных пунктов и рек).

#### Результаты исследования и их обсуждение

Республика Саха (Якутия) – крупнейший регион Российской Федерации. Она расположена в северо-восточной части страны и занимает 1/5 территории Российской Федерации. Общая площадь лесного фонда Республики Саха (Якутия) составляет 256102,7 тыс. га, или 82,5% её территории. Лесистость Республики Саха (Якутия) составляет 51,3%. По всей территории республики преобладают лиственные леса – 90,5% от площади основных лесобразующих пород и 77,6% от всей покрытой лесной растительностью площади республики [8, с. 120]. Доминирующее положение светлохвойных лесов Якутии обусловлено не только биологическими свойствами видов. Имеются сведения, что эти леса имеют пирогенное происхождение [9].

Леса Якутии неустойчивы и чутко реагируют на любые изменения. Деградация многолетней мерзлоты приводит к появлению просадок, которые позднее превращаются в термокарстовые озера, а затем в зрелые аласы, на которых формируется луговая растительность [10].

Пожары воздействуют на температуру грунтов. Поверхность горельников теплее. Пожары, уничтожая травяно-кустарничковый покров и повреждая древостой, резко изменяют структуру теплового баланса. В результате общего разреживания общего растительного покрытия приход солнечной радиации на поверхность заметно возрастает, а ее зачернение снижает отражательную способность поверхности. Поэтому тепловой поток в почву увеличивается и усиливается протаивание грунтов [11, с. 889]. Усиление глобального потепления и влияния человеческого фактора приводит к росту частоты и площади пожаров.

Рост числа лесных пожаров, увеличение их площади негативно сказываются не только на состоянии экосистем Якутии, но и на жизни населения. Поэтому разработка модели риска возникновения лесных пожаров необходима для планирования и проведения превентивных мероприятий.

В условиях засушливого климата, преобладания светлохвойных пород, большими равнинными пространствами леса Якутии становятся чрезвычайно горимыми. Пожары возникают как по природным причинам (грозовые разряды), так и по антропогенным, среди которых немаловажную роль играют сельхозпалы [8].

Воздействие различных факторов на возникновение пожаров было оценено с помощью линейного коэффициента корреляции и коэффициента детерминации (таблица).

Степень воздействия факторов на риск возникновения лесных пожаров  
в Республике Саха (Якутия) [3, с. 71]

Factor	Линейный коэффициент корреляции, R	Коэффициент детерминации, R <sup>2</sup>
Солнечная радиация (излучение)	0,97	0,94
Максимальная температура воздуха	0,93	0,86
Вегетационный индекс (NDVI)	0,91	0,83
Удаленность от рек	0,91	0,83
Среднегодовое количество осадков	-0,33	0,11
Среднегодовая температура воздуха	-0,41	0,17
Направление склона	-0,43	0,19
Абсолютная высота	-0,76	0,58
Удаленность от дорог	-0,80	0,65
Угол наклона (уклон)	-0,97	0,94
Удаленность от населенных пунктов	-0,97	0,94

Как показал проведенный анализ показателей корреляции, не все климатические факторы одинаково влияют на риск возникновения лесных пожаров в Якутии. Солнечная радиация хорошо коррелирует с пожарами: по мере ее увеличения растет количество пожаров. Вероятно, с возрастанием солнечного излучения более благоприятными становятся условия для возгорания. Горючие материалы при этом высыхают быстрее и могут самовозгораться.

С увеличением количества осадков риск возникновения пожара снижается, что показывает умеренная отрицательная корреляция.

Лесные пожары являются сугубо летним явлением. Для общей характеристики лета мы отобрали показатель максимальной температуры воздуха. Он сильно воздействует на возникновение пожаров, что показал коэффициент корреляции 0,93. С ростом летних температур, количество возгораний тоже возрастает.

Как мы и предполагали, количество горючих материалов (биомасса) сильно влияет на возникновение пожаров. Для характеристики данного показателя мы использовали индекс NDVI – количество фотосинтетически активной биомассы. С его ростом возрастает количество пожаров, то есть наблюдается положительная корреляция. Учитывая, что объем биомассы увеличивается с возрастом леса, можно предположить, что риск возникновения пожаров в зрелых древостоях повышен.

Еще одним фактором, воздействующим на лесные пожары, является рельеф земной поверхности. Первый показатель, характеризующий рельеф – это абсолютная высо-

та. Тут мы видим, что количество пожаров уменьшается с набором высоты: коэффициент корреляции равен  $-0,76$ . При анализе данного показателя следует учитывать, что с высотой снижается температура воздуха и снижается количество биомассы.

Земная поверхность редко бывает абсолютно ровной. С увеличением уклона число пожаров снижается – корреляция обратна. Участки, имеющие большой угол наклона, являются барьером для распространения огня, так как на крутых склонах условия для роста растений неблагоприятны и биомасса накапливается слабо. Кроме того, под действием силы тяжести отмершие остатки растений перемещаются вниз. Абсолютно иная картина наблюдается на ровных участках, что приводит к быстрому распространению по ним лесных пожаров.

Экспозиция склона также влияет на лесные пожары. Южные и западные склоны получают больше солнечного света и тепла, нежели северные и восточные. Соответственно, на южных и западных склонах растения развиваются лучше и увеличивается биомасса растений. Кроме того, здесь под действием солнечных лучей быстрее высыхают горючие материалы. В таких условиях огонь может вспыхнуть и распространиться очень быстро.

Кроме участков со значительными углами наклона, роль барьеров в распространении пожаров играют водные объекты – реки, озера, болота. Их воздействие мы оценивали с помощью показателя удаленности от рек. Он показал сильную положительную корреляцию 0,91, то есть чем дальше от рек, тем больше возникает пожаров.

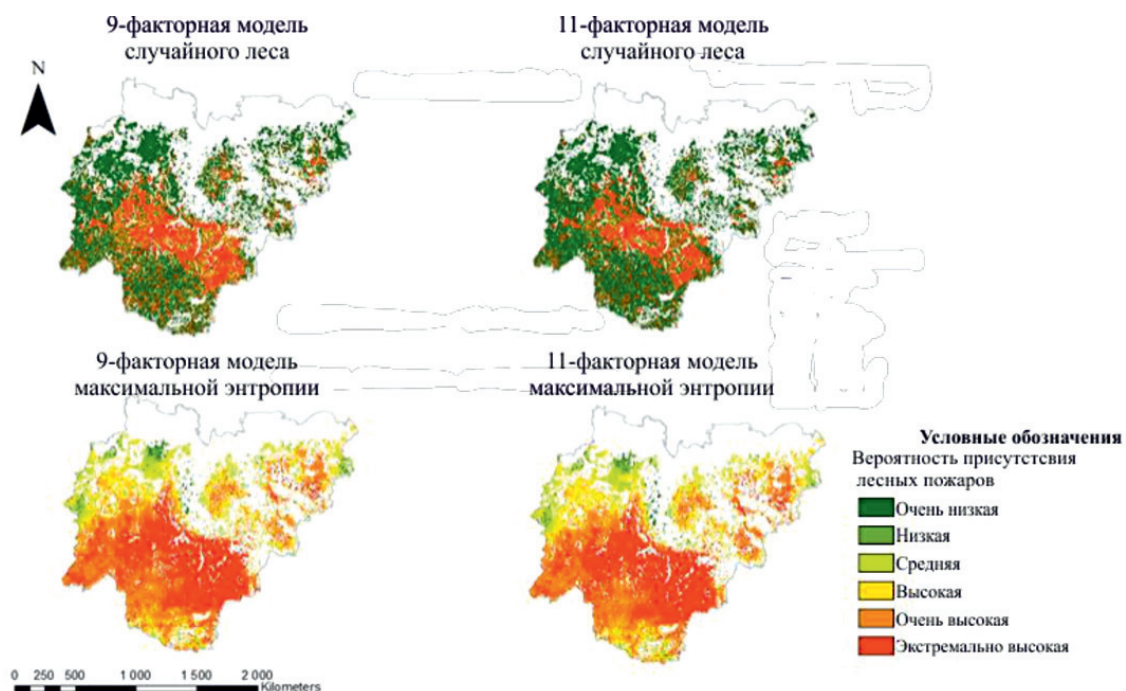


Рис. 2. Моделирование вероятности возникновения лесных пожаров в Республике Саха (Якутия)

Проведенный анализ продемонстрировал большое воздействие антропогенного фактора на возникновение лесных пожаров. Территории, удаленные от поселений и дорог, как правило, не подвергаются воздействию огня: с удалением от дорог снижается число пожаров (коэффициент корреляции составляет  $-0,80$ ). А удаленность от поселений показала практически функциональную зависимость:  $-0,97$ .

Далее проанализируем результаты моделирования риска лесных пожаров в Республике Саха (Якутия). В данном исследовании использовались две модели: модель случайного леса и модель максимальной энтропии, включающие по 9 и 11 факторов.

Мы можем наблюдать существенные различия в пространственном распределении вероятности присутствия пожаров (рис. 2).

С помощью модели случайного леса по пожарному риску территория Якутии была разделена на 2 класса. Экстремально высокая вероятность возникновения пожара наблюдается в бассейне реки Вилюй, Лено-Алданском междуречье и в среднем течении реки Алдан. Небольшие по территории участки также наблюдаются в среднем течении р. Яна и Колымы, то есть там, где в основном проживает население. Также точно наблюдаются участки с экстре-

мальной высокой вероятностью возникновения пожаров на юго-западе республики. На остальной территории Якутии вероятность возникновения пожаров существенно ниже.

9-факторная модель случайного леса показала хорошую дифференциацию территории на разные классы по вероятности возгорания. 11-факторная модель разделила Якутию практически лишь на две части: экстремально высокого и низкого рисков возникновения пожаров.

Модели, созданные с использованием метода максимальной энтропии, показали, что территория Якутии находится в зоне высокой, очень высокой и экстремально высокой вероятности возникновения лесных пожаров. При этом больших различий между 9- и 11-факторными моделями нет. Зона экстремально высокой вероятности возникновения пожаров широкой полосой протянулась с запада на восток, охватив бассейны р. Вилюй, Алдан и среднее течение р. Лена. Очень высокий риск наблюдается в бассейне р. Яна, Индигирка (район Оймякона) и Колымы. Участки со средней, низкой и очень низкой вероятностью возникновения пожаров встречаются на севере в зоне северной тайги и тундры, а также в горных областях.

### Заключение

Проведенный анализ показал, что метод случайного леса дал более точные результаты и гораздо более узкую территорию возможности возникновения пожаров, что позволяет предложить данную модель как более предпочтительную. Модель, созданная с помощью метода максимальной энтропии, имеет малую дифференциацию на зоны. Это не позволяет использовать ее в практической деятельности как малоинформативную.

### Список литературы / References

1. The Far North: plant biodiversity and ecology of Yakutia. Dordrecht; New York: Springer, 2010. 390 p.
2. FRA 2015 Terms and Definitions. Forest Resources Assessment Working Paper 180. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012. 31 p.
3. Янец П. Долгосрочное геоинформационное моделирование риска лесных пожаров в Республики Саха (Российская Федерация): дис. ... магистра географии. Северо-Восточный фед. университет. Якутск, 2019. 53 с.
4. Yanets P. Long-term GIS modeling of forest fire risk in the Republic of Sakha (Russian Federation): dis. ... magistra geographii. Severo-Vostochnyy fed. universitet. Yakutsk, 2019. 53 p. (in Russian).
5. Gralwicz N.J., Trisalyn A.N., Michael A. Wulder. Factors influencing national scale wildfire susceptibility in Canada. *Forest Ecology and Management*. 2012. no 265. P. 20–29. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.10.031.
6. Chandler C., Cheney P., Thomas P., et. al. *Fire in Forestry*. Vol. 1. Forest Fire Behavior and Effects. N.Y.: Wiley-Interscience. John Wiley and Sons. 1983. 450 p.
7. Гришин А.М., Пугачева П.В. Анализ воздействия лесных и степных пожаров на города и поселки и новая детерминированно-вероятностная модель прогноза пожарной опасности в населенных пунктах // *Вестник Томского государственного университета. Серия: Математика и механика*. 2009. № 3. С. 99–108.
8. Grishin A.M., Pugacheva P.V. Analysis of the impact of forest and steppe fires on cities and towns and a new deterministic-probabilistic model of fire hazard prediction in settlements // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika i mekhanika*. 2009. № 3. P. 99–108 (in Russian).
9. López A.S., Jesús S-M-A., Robert E.B. Integration of satellite sensor data, fuel type maps and meteorological observations for evaluation of forest fire risk at the pan-European scale. *International Journal of Remote Sensing*. 2002. vol. 23. no. 13. P. 2713–2719. DOI: 10.1080/01431160110107761.
10. Протопопова В.В., Габышева Л.П. Лесопожарное районирование лесного фонда республики Саха (Якутия) // *Успехи современного естествознания*. 2016. № 8. С. 120–125.
11. Protopopova V.V., Gabysheva L.P. Forest fire zoning of the forest Fund of the Republic of Sakha (Yakutia) // *Advances in current natural sciences*. 2016. № 8. P. 120–125 (in Russian).
12. Габышева Л.П. Роль пожаров в возобновлении лесов Центральной Якутии // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2014. № 1. С. 154–166.
13. Gabysheva L.P. The role of fires in the renewal of forests in Central Yakutia // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2014. № 1. P. 154–166 (in Russian).
14. Лес и вечная мерзлота: Особенности состава и структуры лесов мерзлотного региона, проблемы рационального ведения хозяйства и охраны. Сборник научных трудов. / Под ред. А.П. Исаева, Л.Г. Михалевой. Якутск: Изд. Якутского ун-та, 2000. 190 с.
15. Forest and permafrost: features of the composition and structure of forests in the permafrost region, problems of rational management and protection. Collection of scientific papers. / Pod red. A.P. Isayeva, L.G. Mikhalevoy. Yakutsk: Izd. Yakutskogo un-ta, 2000. 190 p. (in Russian).
16. Николаев А.Н. Дендрохронологические исследования послепожарной реакции древесных пород в Центральной Якутии // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. Т. 12. № 1–3. С. 888–891.
17. Nikolaev A.N. Dendrochronological studies of post-fire reaction of wood species in Central Yakutia // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2010. T. 12. № 1–3. P. 888–891 (in Russian).